УДК 621.039.55.001.4:621.3.014.6

ПРОГРАММНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ И РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ ТЕРМОЭМИССИОННЫХ СИСТЕМ

Ю.В. Бабушкин, В.П. Зимин, Е.А. Хомяков

Томский политехнический университет
E-mail: zimin@ido.tpu.edu.ru

Представлена структура программного комплекса для исследования характеристик термоэмиссионных систем. Описан процесс расчета характеристик электрогенерирующей сборки, состоящий из трех этапов: подготовительный, расчетный и визуализации результатов. В качестве иллюстрации возможностей программного комплекса приведены результаты расчета аномальных характеристик электрогенерирующих сборок.

Практическая реализация технологии вычислительного эксперимента базируется на трех составляющих: модели, алгоритмы и программы. Во многих случаях для проведения вычислительных экспериментов достаточно использовать современные математические пакеты, в которых реализованы эффективные и проверенные временем численные методы решения типовых задач. При моделировании сложных физических установок, к которым, безусловно, относятся термоэмиссионные системы, на этапе создания математического описания производится декомпозиция взаимосвязанных процессов по различным критериям, что приводит к созданию множества иерархических моделей [1] и алгоритмов [2] разной степени сложности. Необходимость учета влияния на исследуемые процессы

конструкций и технологий изготовления физических установок приводит к многовариантности множеств иерархических моделей и, что не менее важно, проблеме хранения исходных данных и результатов вычислительных экспериментов.

Таким образом, основными требованиями к программному обеспечению являются не только реализация эффективных численных методов в каждом программном модуле, но и возможность либо выбора из существующего множества моделей наиболее подходящей, либо оперативное создание новой модели из библиотеки модулей для проведения целенаправленных вычислительных экспериментов, формирования, визуализации и хранения результатов.

Кроме того, в связи с постоянным совершенствованием отдельных программных модулей, а также с целью повышения достоверности результатов программные модули, выполняющие одинаковые функции, должны быть взаимозаменяемы.

В наибольшей степени перечисленным требованиям удовлетворяет подход, основанный на разделении функций подготовки исходных данных в виде банка данных, построения модели в виде цепочки последовательно выполняемых программных модулей, собственно проведения расчетов, а также визуализации полученных данных [3]. Моделирование характеристик электрогенерирующих сборок (ЭГС) выполняется в три этапа [4]. На первом этапе с помощью подготовительных модулей формируются файлы банка данных, в которых содержится информация о геометрических параметрах, электрофизических, эмиссионных и теплофизических свойствах элементов ЭГС. На втором этапе проводится расчет, визуализация и анализ серий вольт-амперных характеристик термоэмиссионного преобразователя (ВАХ ТЭП) для предполагаемых условий работы ЭГС. На третьем этапе рассчитываются температурные и электрические поля и ВАХ ЭГС. Условия расчета ЭГС (распределение тепловыделения, тепловая мощность, давление пара цезия в резервуаре, входная температура и расход теплоносителя, сопротивление нагрузки и количество расчетных точек) задаются в управляющих файлах банка данных. Для моделирования аномальных ситуаций предусмотрены специальные подготовительные модули, позволяющие формировать исходные данные, имитирующие возникновение утечек тока между электродами, через коллекторную изоляцию и между элементами, а также изменения теплофизических свойств материалов, распухание топливно-эмиттерных блоков, вынос топлива в межэлектродные зазоры и т.д.

Входные, выходные и промежуточные данные работы функциональных модулей хранятся в банке данных в виде текстовых файлов.

Расчетные модули создаются на основе программ (процедур и функций), которые реализуют математическое [1] и алгоритмическое обеспечение [2]. Вспомогательные программы также оформляются в виде модулей и объединяются в библиотеки:

- стандартных численных методов;
- программ расчета коэффициентов аппроксимации уравнений тепло- и электропроводности, теплофизических и электротехнических свойств материалов, составляющих тепловых потоков и т.п.;
- чтения файлов исходных данных и записи результатов расчета.

Модули визуализации позволяют просмотреть как исходные данные, так и результаты промежуточных и окончательных расчетов в виде распределений температурных и электрических полей, ВАХ и т.д.

Программные и функциональные модули реализованы с помощью системы программирования Turbo Pascal 7.0. На рис. 1 представлена структурная схема взаимодействия функциональных модулей, библиотек программ и банка данных.

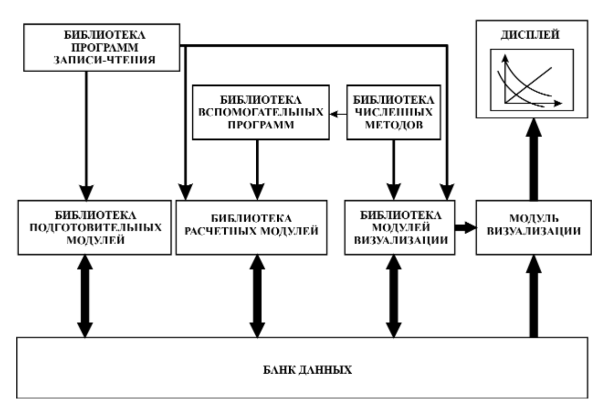


Рис. 1. *Структура программного обеспечения для моделирования термоэмиссионных систем*

Для проведения вычислительных экспериментов в качестве системного программного обеспечения используется пакет программ BrainStorm [5], который обладает следующими возможностями:

- объединение функциональных модулей, реализованных в MS-DOS, в пакет программ с минимальными изменениями их кода;
- добавление новых и замена существующих функциональных модулей;
- запуск модулей на исполнение и автоматизация последовательного выполнения цепочек модулей;
- предоставление доступа к данным и выполнение операций над ними: редактирование, копирование, добавление и удаление без выхода из системной оболочки;
- повышение надежности работы в системной оболочке, в частности, аварийные остановы в модулях не приводят к разрушению файлов и оболочки.

Базовое окно системной оболочки BrainStorm с загруженным пакетом прикладных программ для исследования процессов в термоэмиссионных системах представлено на рис. 2.

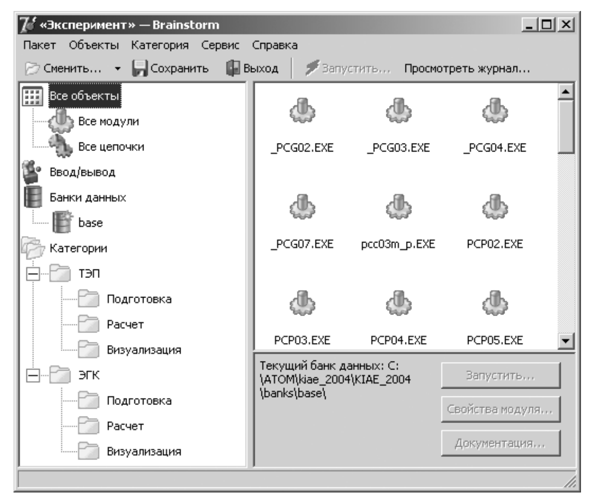


Рис. 2. *Базовое окно системной оболочки Brainstorm*

В таблицах 1–4 приведен перечень и назначение основных функциональных модулей, с помощью которых проводятся исследования различных режимов работы термоэмиссионных систем.

Таблица 1. *Состав функциональных модулей ТЭП*

Наименование модуля	Назначение модуля
	Подготовка:
PCP02	данных для зависимости давления пара цезия от температуры резервуара с цезием
PCP05	кривых Рейзора электродов
	Расчет:
PCC01	вакуумных и квазивакуумных ВАХ
PCC02	диффузионных ВАХ
PCC03m_p	ВАХ по эмпирической и полуэмпирической моделям плазмы ТЭП

Таблица 2. *Состав модулей для расчета электрических процессов ЭГС*

Программный модуль	Назначение модуля
	Расчет:
FPO1	удельного электрического сопротивления материалов
SXEMA1	коэффициентов аппроксимации уравнений электропроводности
VOLT3, VOLT4, VOLT3J, VOLT4J	параметров линейных эквивалентов ТЭП с использованием трех или четырехмерной интерполяции
ELECAN1	распределений потенциалов, токов, напряжений и интегрального значения тока

Верификация различных версий программных модулей производилась в течение ряда лет путем сравнения расчетных результатов с результатами других авторов, а также с экспериментальными данными, полученными при испытаниях различных многоэлементных электрогенерирующих сборок [6].

В качестве иллюстрации возможностей созданного пакета программ рассмотрим экспериментальные и расчетные характеристики пятиэлементной профилированной ЭГС (длины ЭГЭ в ЭГС – 9,55; 4,60; 4,00; 4,60; 9,55 см), основные параметры которой приведены в [7].

Таблица 3. *Состав модулей для расчета тепловых процессов ЭГС*

Программный модуль	Назначение модуля
	Расчет:
FLCS1, FLHE1, FLI1	теплопроводности пара цезия в зазоре, гелия и изоляции системы теплосброса
ISL1	теплового потока излучением
GISL1	распределения тепловыделения за счет нейтронного и гамма излучений
KOER1, KOEDL1	коэффициентов аппроксимации по радиусу и длине
TEMPER	температурного поля
PARCP	средних параметров

Таблица 4. *Состав функциональных модулей для расчета ЭГС*

Функциональный модуль	Назначение модуля
	Расчет:
PEC01	температурного поля вакуумного и диффузионного режимов
PEC02	вакуумных ВАХ
PEC03	переходного режима при заполнении ЭГС цезием
PEC04	изотермических дуговых ВАХ
PEC05	диффузионных ВАХ
PEC06, PEC07	статических и динамических ВАХ
PEC08	переходного режима от диффузионного к дуговому с учетом поджига и гашения дуги

Варианты распределения относительного тепловыделения $q_V(z)$ в топливных сердечниках ЭГС представлены на рис. 3. В соответствии с рекомендациями [6] для проведения расчетов выбран профиль при Q_{VC}=2.

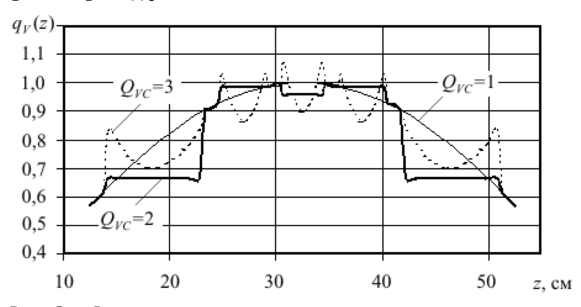


Рис. 3. *Варианты распределения тепловыделения в пятиэлементной ЭГС*

На рис. 4 представлены теоретические кривые Рейзора для эмиттера (вакуумная работа выхода F_E^0=5,0 эВ) и коллектора (F_C^0=5,0 эВ), что соответствует подложкам из вольфрама. ВАХ ТЭП (рис. 5), рассчитывались по эмпирической модели плазмы ТЭП [8] при межэлектродном зазоре d=0,04 см, P_{Cs}=266 Па, температуре коллектора T_C=900 K.

На рис. 6 представлены расчетные (1, 4) и экспериментальные (2, 5) кривые ВАХ пятиэлементной профилированной ЭГС в штатном режиме работы.

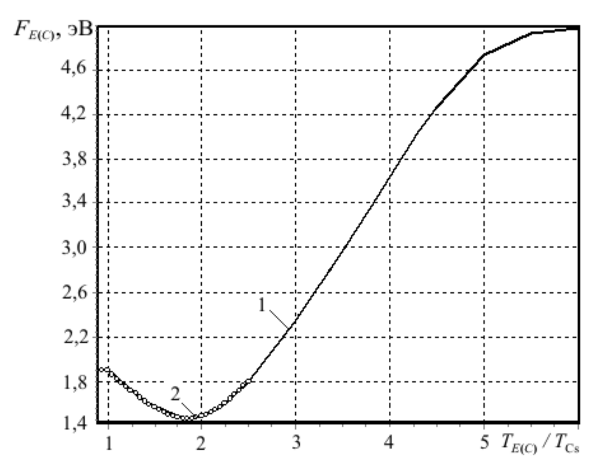


Рис. 4. *Теоретические кривые Рейзора: 1) эмиттера и 2) коллектора*

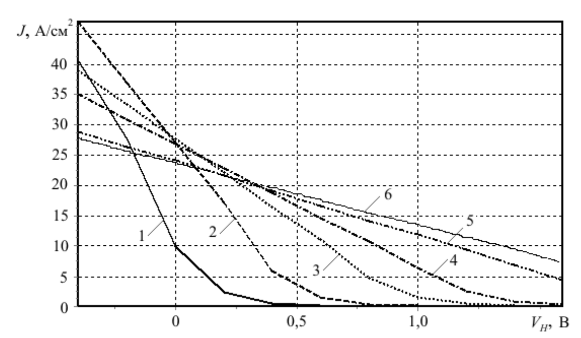


Рис. 5. *ВАХ ТЭП при варьировании температуры эмиттера T_E: 1) 1400; 2) 1600; 3) 1800; 4) 2000; 5) 2200; 6) 2300 K*

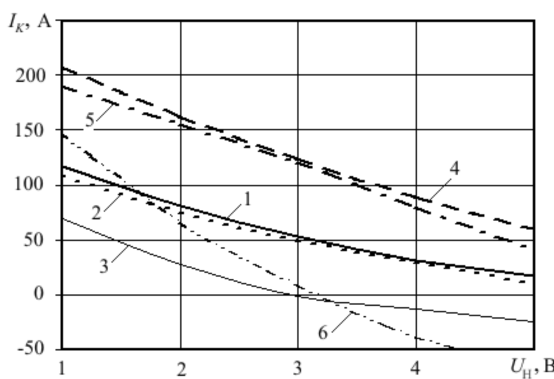


Рис. 6. *ВАХ ЭГС в исходном состоянии и после изменения параметров модели. Тепловая мощность Q: 1–3) 2,5; 4–6) 4,0 кВт*

В качестве иллюстрации дополнительных возможностей алгоритмического и программного обеспечения было предположено, что в ЭГС одновременно произошли следующие изменения. В первом ЭГЭ уменьшилась теплопроводность коллекторной изоляции, во втором возникла утечка тока между электродами, в третьем снизились теплопроводящие свойства изоляции между несущей трубкой и корпусом, а также возникла утечка тока через коллекторную изоляцию.

Зависимости тока от напряжения нагрузки при данных предположениях представлены кривыми 3, 6 на рис. 6. Основным достоинством разработанных программных модулей является не только расчет интегральных ВАХ ЭГС, но и распределений температур, потенциалов и токов в расчетных сечениях, которые позволяют провести анализ внутреннего состояния ЭГС. В качестве примера на рис. 7, 8 представлено распределение температур, токов и напряжений в ЭГС при тепловой мощности Q=4,0 кВт и напряжении на нагрузке U_H=3 В.

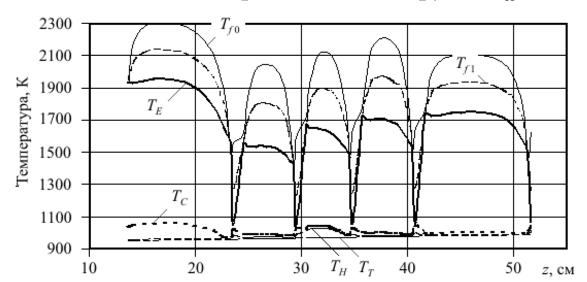


Рис. 7. *Температуры в разных точках ЭГС: T_{f0}, T_{f1} – в топливных сердечниках по оси и на расстоянии радиуса перемычки от центра, T_E, T_C – эмиттера и коллектора, T_H, T_T – несущей трубки и теплоносителя*

Анализ графиков показывает, что в первом ЭГЭ повышена температура коллектора из-за уменьшения теплопроводности коллекторной изоляции. В третьем элементе наблюдается рост температуры несущей трубки и коллектора в связи со снижением теплопроводности изоляции между несущей трубкой и корпусом. Во втором элементе при наличии электропроводящих мостиков между электродами за счет увеличения тока (рис. 8) происходит снижение уровня температурного поля эмиттера и разности потенциалов между электродами U_C.

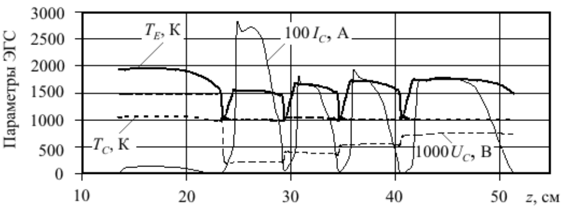


Рис. 8. *Распределение температур эмиттера (T_E), коллектора (T_C), токов (I_C) и напряжений (U_C) в ЭГС при изменении параметров*

Наконец, в связи с утечкой тока через коллекторную изоляцию в третьем элементе происходит рост тока, снижение напряжения между электродами и уровня температур эмиттеров в последних трех ЭГЭ.

Следует отметить, что электрический пробой коллекторной изоляции при принятой коммутации элементов в ЭГС приводит к повышению температурного поля в ЭГЭ, расположенных до места пробоя и снижению температур эмиттера в ЭГЭ, расположенных после места пробоя относительно исходного уровня. Так в данном случае величина тока, проходящего через нагрузку по первому токовыводу равна 9,6 А, по коммутационной перемычке второго элемента 239,3 А, а по последним трем элементам и второму токовыводу – 141,7 А. Данное обстоятельство позволяет сделать вывод о необходимости перевода ЭГС в область короткого замы-

кания с целью гарантированного исключения перегрева эмиттера первого ЭГЭ [9]. По результатам измерения напряжения и токов на токовыводах предложен способ определения ЭГЭ, в котором произошел пробой коллекторной изоляции [6].

Полученные результаты свидетельствуют об адекватном качественном поведении выходных характеристик используемой математической модели при изменении теплофизических параметров и внутреннего состояния ЭГЭ в ЭГС.

Разработанный комплекс программ нашел применение для оценки внутренних неизмеряемых параметров ЭГС, а также отработки гипотез при аномально высоких временах переходных процессов [6, 10], получении гистерезисных статических ВАХ во время проведения испытаний энергонапряженных ЭГС по программе РКК "Энергия" на реакторе ВВР-К [6].

Выводы

1. Создан пакет прикладных программ для моделирования термоэмиссионных систем, включающий подготовку исходных данных, расчет серий ВАХ ТЭП в вакуумном, диффузионном и разрядном режимах работы, а также статических и динамических характеристик многоэлементной электрогенерирующей сборки.
2. Разработанное программное обеспечение позволяет рассчитывать температурные и электрические поля различных конструкций электрогенерирующих сборок с учетом изменения эмиссионных, тепло- и электрофизических свойств материалов, профиля и уровня распределения тепловыделения в топливных сердечниках, изменения условий охлаждения и электрической нагрузки ЭГС, исследовать аномальные ВАХ и изучать причины их возникновения.
3. Опыт использования пакета программ для расчета серий ожидаемых ВАХ и анализа аномальных результатов реакторных испытаний ЭГС подтвердил правильность концептуальных решений, заложенных при его проектировании и программировании.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Бабушкин Ю.В., Зимин В.П. Математическое обеспечение программного комплекса для моделирования термоэмиссионных систем // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 1. – С. 51–55.
2. Бабушкин Ю.В., Зимин В.П. Методы расчета вольт-амперных характеристик термоэмиссионных электрогенерирующих сборок // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 2. – С. 135–139.
3. Комплекс программ для расчета характеристик петлевого канала / Ю.В. Бабушкин, В.П. Зимин, А.П. Савинов и др. // Непосредственное преобразование тепловой энергии в электрическую: Тезисы докладов отрасл. конф. – Обнинск: Изд-во ФЭИ, 1984. – С. 122.
4. Бабушкин Ю.В., Зимин В.П., Синявский В.В. Моделирующая система KOPTES для исследования тепловых и электрических процессов в термоэмиссионных системах преобразования энергии // Ракетно-космическая техника: Труды. Сер. XII. – Вып. 1–2. Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем / Под ред. В.В. Синявского. – Калининград, Моск. обл.: РКК «Энергия», ОНТИ, 1998. – С. 60–78.
5. Зимин В.П., Хомяков Е.А. Разработка системной оболочки проблемно-ориентированных пакетов прикладных программ // Вычислительные технологии и математические модели в науке, технике и образовании: Докл. Междунар. конф. – Алма-Ата, 2003. – С. 55–58.
6. Синявский В.В. Методы и средства экспериментальных исследований и реакторных испытаний термоэмиссионных электрогенерирующих сборок. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 375 с.
7. Разработка и ресурсные реакторные испытания термоэмиссионного ЭГК с карбидным топливом / Ю.В. Николаев, В.Н. Андреев, В.И. Выбыванец и др. // Ракетно-космическая техника. Труды. Сер. XII. – Вып. 2–3. Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем. Ч. 2 / Под ред. В.В. Синявского. – Калининград, Моск. обл.: РКК «Энергия», ОНТИ, 1996. – С. 85–98.
8. Расчет разрядных вольт-амперных характеристик ТЭП / В.П. Зимин, А.П. Савинов, В.В. Синявский и др. // Госфонд алгоритмов и программ СССР. – ОФАП САПР. – ГОНТИ, 1983. – Вып. 21. – С. 8.
9. Бабушкин Ю.В., Синявский В.В. Численное моделирование температурных и электрических полей электрогенерирующих каналов при возникновении утечек тока // Ракетно-космическая техника: Труды. – Сер. XII. – Вып. 3–4. Расчет, проектирование, конструирование и испытания космических систем / Под ред. В.В. Синявского. – Калининград, Моск. обл.: РКК «Энергия», ОНТИ, 1995. – С. 136–144.
10. Бабушкин Ю.В., Савинов А.П., Синявский В.В. Оценка предельных скоростей съема вольт-амперных характеристик термоэмиссионных сборок // Известия АН СССР. Сер. Энергетика и транспорт. – 1984. – № 5. – С. 95–103.